

Nationalekonomiska Institutionen

Optimal användning av fossila naturresurser vid förekomsten av externa miljökostnader

- en teoretisk ekonomisk analys

"It is plausible, in fact, given existing energy-supply systems, end-use technologies and end-use patterns, that most industrialized nations are near or beyond the point where further energy growth will create greater marginal costs than benefits."
(John P. Holdren, Scientific American, sept 1990.)

Magisteruppsats HT-05 (10 p)

Torben Eliasson

Handledare: Krister Hjalte

2006-02-09

VISIT…

LANZAROTE
Caliente.com

Sammanfattning/Abstract

Världens energisystem är huvudsakligen baserade på fossila bränslen. Förbränning av fossila bränslen medför olika konsekvenser för miljön såsom ökad växthuseffekt och försurning. Kostnaderna för dessa miljökonsekvenser är vanligen externa och därmed sällan inkluderade i priserna på marknaden. Mot denna bakgrund är det samhällsekonomiskt intressant att analysera hur resursanvändning och energiproduktion påverkas ifall dessa kostnader internaliserades i priserna på världens energi- och råvarumarknader.

Som teoretisk bakgrund för analysen presenteras en ekonomisk teori för optimal resursanvändning. Därefter redovisas några vanliga miljökonsekvenser av fossil energiproduktion, däribland tänkbara konsekvenser av ökad växthuseffekt. Med utgångspunkt i växthuseffektens miljökonsekvenser skapas sedan en teoretisk miljökostnadsfunktion som inkluderas i teorin.

Resultatet blir med utgångspunkt i teorin att ett större samhällsekonomiskt hänsynstagande till externa miljökostnader kan väntas göra fossil energiproduktion olönsam i ett tidigare skede än vad som annars vore fallet. Alternativa, mindre miljöskadliga energiteknologier, med högre privata marginalkostnader, kan därmed väntas bli konkurrenskraftiga i ett tidigare skede än vad som vore fallet om kostnader för samhället ej internaliseras i energipriserna.

I frånvaron av externa miljökonsekvenser är ett nödvändigt villkor för optimalitet att nettopriset (samhällets intäkt minus utvinningskostnad) ökar i takt med samhällets ränta för intertemporal fördelning, vilket benämns Hotellings regel. Vid förekomsten av miljökonsekvenser tycks Hotellings regel upphöra som optimalitetsvillkor, och analysen pekar på att detta orsakas av att en resurs som går mot ekonomisk utmattning inte är att betrakta som knapp i någon fysisk mening.

Sökord: fossila naturresurser, externa miljökostnader, Hotellings regel, optimal resursanvändning.

Innehållsförteckning

1. Inledning **5**

1.1 Utgångspunkt och problemställning 5

1.2 Syfte och metod 6

1.3 Material 6

1.4 Avgränsningar 6

1.5 Översikt 7

2. Den ekonomiska teorin för optimal användning av icke förnybara naturresurser **8**

2.1 Syfte med kapitlet 8

2.2 Antaganden och begränsningar 8

2.3 En enkel modell för två perioder – Hotellings regel 9

2.4 Generalisering av modellen till kontinuerlig tid 13

3. Fossila resurser, miljön och växthuseffekten **17**

3.1 Världens energisystem – fossila bränslen dominerar 17

3.2 Utsläpp och miljöskador i samband med fossil energiproduktion 17

3.3 Växthuseffekten 19

3.4 Konsekvenser av en ökad växthuseffekt 21

3.5 Ackumulerade utsläpp och varierande marginalkostnader 22

3.6 Att värdera miljökonsekvenser 23

4. Ökande miljökostnader – en kostnadsfunktion som tar hänsyn till ackumulerade utsläpp av CO_2 **24**

4.1 Inledning 24

4.2 En miljökostnadsfunktion för växthuseffekten 25

4.3 Miljökostnaderna inkluderade i teorin 26

4.4 Den kompletterade modellen i sin helhet 29

4.5 Hotellings regel – fördjupad analys 30

5. Slutsatser **34**
5.1 Slutsatser inom ramen för teorin 34
5.2 Empirisk epilog 35

6. Litteraturlista **38**

1. Inledning

1.1 Utgångspunkt och problemställning

Världens samlade energiproduktion är till cirka 80 % baserad på fossila bränslen. Förbränningen av fossila bränslen leder till miljökonsekvenser bl.a. i form av ökad växthuseffekt, försurning och olika negativa effekter för människors hälsa.[1] Utsläppen av koldioxid, som räknas som den viktigaste växthusgasen, härstammar till ungefär 75 % från förbränning av kol, olja och gas.[2] Miljökonsekvenser är ofta externa, vilket från ekonomisk synvinkel innebär att varken producenter eller konsumenter bär kostnaden för dem i utbytet av varor och tjänster på marknaden. Därmed saknas, från ekonomisk synvinkel, ofta viktiga incitament för att begränsa produktion och användning av fossilbaserad energi, och i förlängningen också för att begränsa miljöskadorna.

Omfattande ekonomisk litteratur innehåller modeller som beskriver hur man effektivast använder icke-förnybara naturresurser, till vilka fossila bränslen räknas. En vanlig utgångspunkt i sådana modeller är att inga externaliteter förekommer, vilket mot bakgrund av dagens globala miljöproblematik riskerar att generera ohållbara resultat. I uppsatsen kommer därför ekonomiska resonemang föras kring frågan om hur ett större hänsynstagande till miljökostnader kan tänkas förändra sådana modeller.

Uppsatsens huvudsakliga frågeställning är att analysera hur inlemmandet av miljökostnader i en enkel ekonomisk modell förändrar den teoretiskt optimala resursanvändningen. Detta bedömer författaren vara en samhällsekonomiskt relevant problemställning p.g.a. det faktum att alternativa, mindre miljöpåverkande, energiteknologier faktiskt finns tillgängliga redan idag, men till högre privata marginalkostnader. En förändrad kostnadsbild för fossil energiproduktion, där större hänsyn tas till miljöpåverkan, kan väntas påverka alternativens konkurrenskraft och

---

[1] Boyle(1996), kapitel 1.3.
[2] Hoel&Kverndokk(1996).

öka deras andel i världens energiproduktion. Därmed är det ur miljöekonomisk synvinkel viktigt att miljöskadornas kostnader analyseras till sin natur, och att dessa kostnader sedan inkluderas i teorin för optimal resursanvändning.

1.2 Syfte och metod

Syftet är att med utgångspunkt i en modell för optimal användning av icke-förnybara naturresurser, analysera hur en specifik teoretisk miljökostnadsfunktion påverkar villkoren för optimalitet och modellens resultat. Den miljökostnadsfunktion som analyseras bygger på antaganden och fakta kring växthuseffekten och dess förväntade miljökonsekvenser.

Metoden som används är att via litteraturstudier, teoretiska resonemang och en befintlig ekonomisk modell förena teorin för optimal resursanvändning med förekomsten av externaliteter. Genom att låta växthuseffektens förväntade miljökostnader ta plats i den befintliga modellen kan de genererade resultaten vid optimalitet diskuteras och sannolikt även komma att omprövas.

1.3 Material

Uppsatsen bygger huvudsakligen på ekonomisk teoretisk litteratur och artiklar med miljöekonomisk anknytning. Utöver detta har en del litteratur som behandlar energisystem studerats, samt några forskningsrapporter där miljöproblem analyseras ur ett brett energi- och miljöperspektiv.

1.4 Avgränsningar

Uppsatsen behandlar endast icke-förnybara naturresurser. Med icke-förnybara naturresurser avses de resurser som inte kan återskapas inom överskådliga

tidsrymder.[3] Det innebär att när en viss resurs väl utvunnits och förbrukats är den uttömd för överskådlig framtid.[4]

Till icke-förnybara resurser räknas mineraler (t ex koppar, zink och järn), samt fossila energiresurser (t ex olja, kol, naturgas och uran).

I fortsättningen av detta arbete behandlas uteslutande kolbaserade energiresurser.[5] Orsaken till denna avgränsning är huvudsakligen den nära kopplingen mellan förbränningen av kolbaserade fossila bränslen och flera förekommande och väl kända miljöproblem.

1.5 Översikt

Efter detta inledande kapitel följer fyra kapitel, vilka är indelade i kortare avsnitt. Kapitel 2 är en genomgång och översikt av teorin och en befintlig modell för optimal användning av icke-förnybara resurser, vanligt förekommande i ekonomisk litteratur om naturresursutvinning. Kapitel 3 behandlar kortfattat världens energianvändning, och uppmärksammar några förekommande miljöproblem som uppkommer vid förbränning av fossila bränslen. Kapitel 4 syftar till att förena modellen från kapitel 2 med växthuseffektens miljöproblem i kapitel 3, för att undersöka hur villkoren för optimalitet och resultaten från modellen ändras när hänsyn tas till samhällets kostnader till följd av klimatpåverkan. Kapitel 4 är tillika uppsatsförfattarens eget bidrag till den ekonomiska analysen kring naturresursutvinning och miljökostnader. Kapitel 5 innehåller en kortfattad sammanfattning inom ramen för teorin, samt en "empirisk epilog", ett försök att relatera analysen i detta arbete verklighetens energi- och miljöpolitiska agenda.

---

[3] Fossila naturresurser behöver årmiljoner för att bildas och kommer därför inte att återskapas under tidperioder som kan överblickas av den mänskliga civilisationen.
[4] Bortsett från återvinning av resursen, vilket ej är möjligt vid förbränningen av fossila naturresurser.
[5] Därmed behandlas inte uran. Miljökonsekvenserna av urananvändning skiljer sig från övriga fossila bränslen, bl a förekommer ingen inverkan på växthuseffekten.

2. Den ekonomiska teorin för optimal användning av icke förnybara naturresurser

2.1 Syfte med kapitlet

Kapitlet är en sammanfattning av den teoretiska modell som presenteras i Perman&Ma&McGilvray(1996), kompletterat med en del resonemang som förs kring en liknande modell i Tietenberg(1992). Teorin är till stora delar densamma, med vissa variationer i modellernas omfattning. Syftet med att presentera och sammanfatta modellen är att lyfta fram de grundläggande resonemangen i teorin, för att skapa förutsättningar för en fördjupad analys och diskussion av sambanden mellan fossila bränslen, miljökostnader och samhällsekonomisk optimalitet.

2.2 Antaganden och begränsningar

I detta kapitel görs följande antaganden om den hypotetiska resurs som modellen beskriver;

- resursen finns i en begränsad, känd mängd,
- den håller samma kvalitet på alla fyndplatser,
- ingen teknologisk utveckling fortgår under tiden för utvinning,
- den kan överallt utvinnas till samma konstanta marginalkostnad,
- inga externa effekter förekommer.

Realismen i dessa antaganden kan ifrågasättas[6]. Jag återkommer till detta i kapitel 4 samt i uppsatsens avslutning.

Vidare antas att utvinning och förbrukning av resursen hanteras av en fullständigt informerad samhällsplanerare. Givet vissa antaganden skulle användningen av naturresurser följa samma mönster på en marknad med fri konkurrens, som i fallet

[6] Exempelvis upptäcks fortfarande nya fyndigheter av fossila naturresurser. Dessutom pågår en löpande teknologisk utveckling, och förekomsten av ej internaliserade miljökostnader torde ingen bestrida idag.

med nyss nämnda samhällsplanerare.[7] Dessa antaganden inkluderar bl. a. att inga externaliteter förekommer (eller är optimalt internaliserade i marknadspriserna), att inga transaktionskostnader existerar och att perfekt information föreligger vid alla transaktioner.[8] I den fortsatta redogörelsen utgår jag ifrån att en samhällsplanerare ställs inför problemet att ekonomiskt optimera användningen av en kolbaserad energiresurs i samhället, dvs. maximera skillnaden mellan samhällets intäkter och kostnader över tiden vid utvinning och förbrukning av nämnda resurs.

2.3 En enkel modell för två perioder – Hotellings regel

Antag att samhällsplaneraren ställs inför problemet att fördela en viss resurs, R, över tiden. I detta enkla exempel består tiden av två perioder, som vi kallar 0 och 1. Resursen skall användas i sin helhet, eftersom planeraren annars inte maximerar samhällets vinst, givet den konstanta marginalkostnaden för utvinning och frånvaron av externa effekter.[9] Den totala resursmängden betecknas H*. Summan av den mängd av resursen som används i period 0, R_0, och den mängd som används i period 1, R_1, är alltså lika med den totala mängden; $R_0 + R_1 = H^*$. Antag vidare att den inverta efterfrågefunktionen kan skrivas

$$P_t = Ke^{-aR_t}$$

dvs. priset i period t, P_t, bestäms av mängden utvunnen resurs i t, R_t. Då kan vi teckna efterfrågan i de båda perioderna som

$$P_0 = Ke^{-aR_0}$$

$$P_1 = Ke^{-aR_1}$$

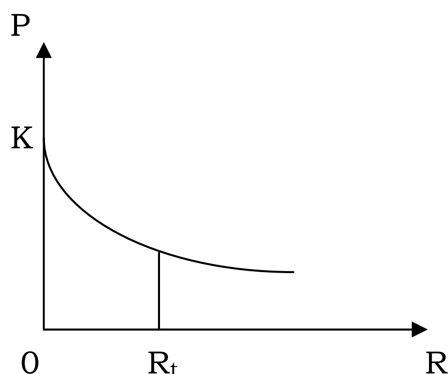
Att efterfrågan är lika med noll när priset når K innebär antingen att resursen inte är kritisk för samhället eller att ett substitut finns till priset K.

---

[7] Perman(1996), kap 6, s 152.
[8] Perman(1996), kap 4, box 4.4, s 93.

Tillämpat på fallet med fossila energiresurser kan man anta att någon alternativ energiteknologi (en ”back-stop technology”) tar vid när priset når K. Figur 2.3.1 illustrerar en generell efterfrågekurva för R.

Figur 2.3.1: Generell efterfrågekurva för en resurs, R, med ett substitut till priset K.



Antag vidare att resursmängden R_t konsumeras under perioden t. Total behållning (benefit, B) för samhället från den konsumerade resursmängden R_t i t, blir då integralen mellan 0 och R_t under efterfrågekurvan i figur 2.3.1.

$$B(R_t) = \int_0^{R_t} Ke^{-aR} dR = \frac{K}{a}(1 - e^{-aR_t})$$

Uttrycket innebär alltså att samhällets *bruttobehållning* i t beror av konsumerad kvantitet av resursen, dvs. R_t. För att teckna *nettobehållningen* av att konsumera R_t måste utvinningskostnader dras ifrån B. Vi har i kapitlets inledning antagit att marginalkostnaden för utvinning är konstant över tiden, vilket innebär att kostnadsfunktionen är linjär, och därmed kan skrivas som

$$C_t = cR_t$$

där C_t är kostnaden för att utvinna R_t, och c är den konstanta utvinningskostnaden på marginalen.

[9] Med en ökande marginalkostnad (med eller utan miljökostnader) kan det ibland vara optimalt att inte utvinna hela resursen.

Samhällets nettobehållning (SNB), av att utvinna R_t i t blir

$$SNB(R_t) = B_t - C_t = \frac{K}{a}(1 - e^{-aR_t}) - cR_t$$

Om vi antar att den mängd av resursen som utvinns i en period också förbrukas i samma period, och att samhällsnyttan av att använda denna resursmängd kan likställas med den monetära nettobehållningen, blir målet för en rationell samhällsplanerare att välja R_0 och R_1 så att nettobehållningen maximeras. Under antagande att samhällets intertemporala välfärdsfunktion är utilitaristisk, och att framtida konsumtionsvärden diskonteras med en ränta motsvarande r, kan vi nu teckna den välfärdsfunktion, W, som skall maximeras över perioderna 0 och 1:

$$W = SNB_0 + \frac{SNB_1}{(1+r)}$$

med den enda begränsningen att totala mängden utvunnen resurs i perioderna 0 och 1 är lika med H*. Optimeringsproblemet kan nu definieras;

$$\max W = SNB_0 + \frac{SNB_1}{(1+r)}$$

$$\text{givet } H^* \text{-} R_0 - R_1 = 0$$

vilket Perman&Ma&McGilvray(1996) löser med lagrangemultiplikatormetoden, genom att följande Lagrangefunktion tecknas:

$$L = (\frac{K}{a}(1 - e^{-aR_0}) - cR_0) + \frac{(\frac{K}{a}(1 - e^{-aR_1}) - cR_1)}{(1+r)} - \lambda(H^* - R_0 - R_1)$$

Efter derivering med avseende på R_0 och R_1, och efter substitution med den efterfrågekurva som definierades i avsnittets inledning, erhålls efter förkortning

$$P_0 - c = \frac{P_1 - c}{(1+r)} \quad \Leftrightarrow \quad P_0 - c + (P_0 - c)r = P_1 - c$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{(P_1 - c) - (P_0 - c)}{(P_0 - c)} = r$$

där P_n-c betecknar resursens nettopris, (användarkostnad[10]). Uttrycket x visar att förändringen i nettopriset över tiden skall motsvara räntan, r, för att optimera resursanvändningen. Om vi sätter P_n-c = NP_n, och generaliserar till två på varandra följande tidsperioder, erhålls uttrycket

$$\frac{NP_t - NP_{t-1}}{NP_{t-1}} = r$$

vilket kallas Hotellings regel. Givet gjorda antaganden visar det sig alltså att optimal användning av icke-förnybara naturresurser kräver att förändringen i nettopriset över tiden motsvarar samhällsräntan. Ett annat sätt att formulera detta villkor är att nuvärdet av nettopriset skall hållas konstant. Men vad består då nettopriset av? Nettopriset är skillnaden mellan marknadspris och utvinningskostnad på marginalen. I nuvarande exempel har den marginella utvinningskostnaden antagits vara konstant, vilket betyder att ett ton kostar lika mycket att utvinna oavsett när i tiden detta sker, och oavsett tidigare ackumulerad utvunnen mängd vid varje givet tillfälle. Nettopriset utgör därmed en slags kostnad för att kompensera kommande generationer för utebliven konsumtion av resursen, eller annorlunda uttryckt, för att avspegla resursens knapphet. När vi använder ett ton av en viss resurs, så minskar vi samtidigt tillgänglig framtida resursmängd med ett ton. Att vi tar ut detta värde idag minskar samtidigt möjligheten att ta ut samma värde i framtiden. Därför benämns nettopriset ibland användarkostnad; dvs. vår generation betalar ett allt högre pris för att *använda* resursen i takt med att fyndigheterna utarmas. Desto mindre mängd resurs kvar, desto högre användarkostnad av att kommande generationer går miste om konsumtion. Vad Hotellings regel säger är alltså att

ökningen i användarkostnaden skall motsvara räntan[11], eller annorlunda uttryckt, nuvärdet av användarkostnaden skall vara konstant över tiden. Jag återkommer till användarkostnaden och dess relation till miljökostnader i kapitel 4.

Sammanfattningsvis kan konstateras att det är möjligt att utifrån en given efterfrågefunktion, Hotellings regel, och ett givet värde på räntan r, räkna fram de värden på R_0 och R_1 som optimerar välfärdsfunktionen. Modellen har dock en viktig begränsning. Ifall tiden inte endast består av idag och imorgon, 0 och 1, så blir den oanvändbar i nuvarande utformning. Modellen behöver alltså generaliseras till flera perioder.

2.4 Generalisering av modellen till kontinuerlig tid

Då modellen anpassad till kontinuerlig tid kräver mycket utrymme redovisad i sin helhet, samt ett stort inslag av matematik, begränsar jag mig till att formulera optimeringsproblemet i enlighet med Perman&Ma&McGilvray(1996), för att därefter grafiskt redovisa en generell lösning. Den grafiska lösningen kan sedan med fördel användas som underlag för analysen när miljökostnader inkluderas teorin.

För att underlätta redovisningen sätts den konstanta utvinningskostnaden till 0, vilket gör att nettopriset, NP, blir detsamma som marknadspriset, P. Fortfarande gäller våra antaganden från avsnitt 2.2. Liksom tidigare är uppgiften att maximera samhällets nettobehållning över tiden, med den skillnaden att vi nu avser göra det i kontinuerlig tid.

Antag att utvinningen av resursen pågår till en tänkt tidpunkt T och att SNB bestäms av konsumtionen av R. Då kan man liksom förut teckna en välfärdsfunktion, W:

$$W = SNB_0 + \frac{SNB_1}{(1+r)} + \frac{SNB_2}{(1+r)^2} + \ldots + \frac{SNB_T}{(1+r)^T} = \sum_{t=0}^{t=T} \frac{SNB_t}{(1+r)^t}$$

---

[10] Engelska termer som används är resource rent, royalty, user cost och net price.
[11] Enkelt uttryckt den ränta som sammantaget avspeglar samhällets preferenser om fördelning av intäkter mellan nutid och framtid.

vilken är uttryckt i diskret tid. Motsvarande funktion i kontinuerlig tid blir

$$W = \int_0^T SNB(R(t))e^{-rt}dt$$

vilket därmed är den funktion som skall optimeras. Optimeringsproblemet består då i att välja R_t för t=0 till t=T så att W1 maximeras, samt att bestämma den optimala tidpunkten T. Med tidigare antaganden om frånvaron av externa effekter och konstant marginalkostnad för utvinning, skall resursen vara helt uttömd vid T för att optimera W. Den begränsning vi har är som tidigare att summan av utvunna kvantiteter i alla perioder skall motsvara den totala mängden fyndigheter, H*. Denna restriktion kan i kontinuerlig tid formuleras

$$\int_0^T R(t)dt = H*$$

där likhetstecknet implicerar att hela resursmängden skall användas. Likhetstecknet skulle kunna kompletteras med ett <, men eftersom vi har antagit att optimalitet kräver utnyttjande av hela resursmängden är det inte nödvändigt i det här fallet. Om man definierar den kvarvarande mängden resurs i varje tidpunkt, t, som skillnaden mellan den totala ursprungliga resursmängden och ackumulerad utvunnen resurs fram till och med t, kan man teckna funktionen enligt

$$H(t) = H* - \int_0^T R(t)dt$$

vilket efter differentiering ger

$$\dot{H}(t) = \frac{dH}{dt} = -R(t)$$

som illustrerar resursflödet över kontinuerlig tid. Den marginella förändringen i fyndigheten motsvarar alltså det marginella uttaget. Denna flödesfunktion utgör

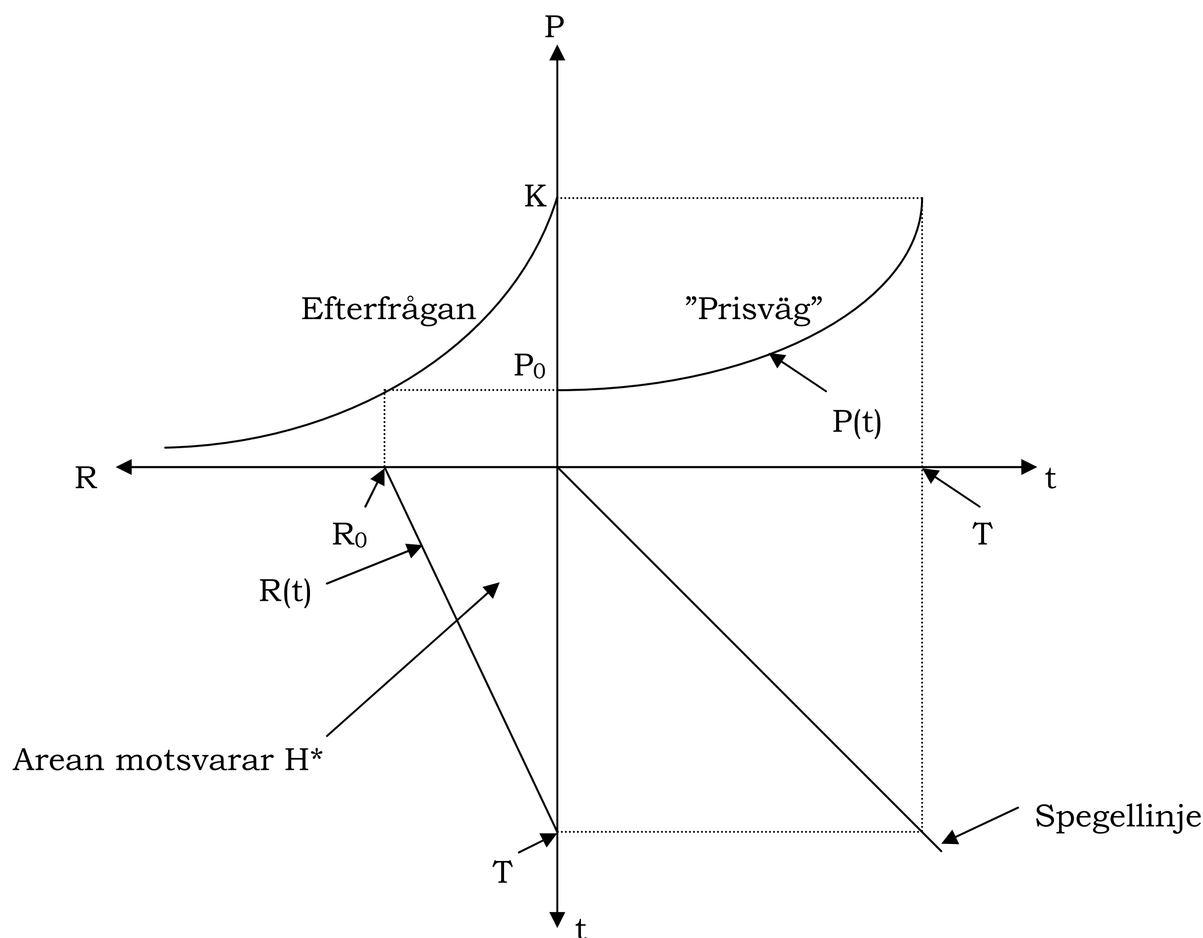
restriktion i optimeringsproblemet över kontinuerlig tid. Innan en lösning kan redovisas återstår så att explicit ställa upp optimeringsproblemet i sin helhet;

$$\max W = \int_0^T SNB(R(t))e^{-rt}\,dt$$

$$\text{givet } \dot{H} = -R(t)$$

Problemet kan lösas med dynamisk optimering.[12] En generell grafisk lösning på problemet redovisas i figur 2.4.1. Som tidigare är Hotellings regel ett nödvändigt villkor för ett maximum.

Figur 2.4.1: En generell grafisk lösning till optimeringsproblemet över kontinuerlig tid.



[12] Dynamic optimisation, optimal control theory. Se Perman(1996), kap 5, appendix 3.

Figur 2.4.1 visar en generell lösning i sin helhet. Varje specifik lösning på problemet beror av de initiala antaganden som görs med avseende på efterfrågan, ränta och välfärdsfunktion. En annan styrande faktor är mängden resurs som finns tillgänglig när t=0. I det fall någon dessa faktorer justeras kommer en ny lösning att ta form, med ändrad ”prisväg” och nytt värde på T. Ur den generella lösningen kan även utläsas att den utvunna volymen per tidsenhet minskar över tiden, och att priset hela tiden ökar för att avspegla den stigande användarkostnaden. Desto mindre av resursen som finns kvar, desto mer är varje ton värt. Optimalitet kräver att priset når K när resursen är uttömd, och $R_t \rightarrow 0$ när $t \rightarrow T$.

En viktig grund för de fortsatta resonemangen är förståelsen för vad priset, eller den totala marginalkostnaden, består av i modellen. Den totala marginalkostnaden består i den redovisade modellen av två komponenter; dels *utvinningskostnad*, och dels *användarkostnad.* Denna användarkostnad beror av att dagens konsumtion av resursen medför minskade möjligheter för framtida utvinning – och därmed konsumtion – av resursen. Antaget att den marginella utvinningskostnaden är konstant, består ökningen i resursens pris över tiden endast av ökande marginella användarkostnader till följd av att knappheten ökar när den tillgängliga mängden av resursen minskar.

I det fall de marginella utvinningskostnaderna istället ökade med tiden, vilket är ett troligt scenario i verkligheten, skulle framtida konsumtion av resursen ständigt fördyras, med resultatet att de marginella användarkostnaderna minskade över tiden. Resurspriset skulle därmed fortsätta att öka, men inte användarkostnaderna.

Jag återkommer till detta resonemang i samband med analysen i kapitel 4. En annan fråga som behandlas i kapitel 4; vad händer med Hotellings regel när samhällets kostnader för att utvinna och förbruka resursen stiger med tiden? Behöver den omformuleras, eller blir den helt enkelt ogiltig när modellens antaganden förändras?

3. Fossila resurser, miljön och växthuseffekten

3.1 Världens energisystem – fossila bränslen dominerar

Olja, kol och naturgas står tillsammans för ungefär 75 % av världens energitillförsel,.[13] Resterande energi kommer huvudsakligen från vattenkraft, biomassa och kärnkraft. Även vind, sol och vågkraft bidrar till energiproduktionen, men i förhållandevis små mängder.

Användningen av fossila bränslen för energiändamål medför olika miljökonsekvenser som inte sällan är vad ekonomer kallar externa, dvs. de kostnader som drabbar samhället avspeglas inte i marknadspriserna. Därmed kommer varken köpare eller säljare att ta ekonomisk hänsyn till miljöskador, vilket leder till en ur samhällsekonomisk synvinkel alltför omfattande användning av fossila bränslen. Att externa kostnader i form av miljöförstörande utsläpp förekommer i samband med utvinning och förbränning av fossila resurser är ett faktum.[14] Det medför att den grundläggande teori som presenterades i kapitel 2 måste kompletteras och revideras för att kunna hantera miljökostnader.

3.2 Utsläpp och miljöskador i samband med fossil energiproduktion

Förbränning av fossila bränslen medför utsläpp av olika luftföroreningar, med varierande effekter och påverkansområden. Koldioxid (CO_2), svaveldioxid (SO_2), kväveoxider(NO_x), flyktiga kolväten(VOC) och sotpartiklar räknas till de allvarligaste luftföroreningarna. Konsekvenserna varierar från att i fallet med CO_2 vara globala och långsiktiga, till att i fallet med VOC vara lokala och förhållandevis kortsiktiga. Mot bakgrund av att ca 75 % av världens samlade utsläpp av CO_2 härstammar från förbränning av fossila bränslen[15], väljer jag att behandla CO_2 separat. CO_2, växthuseffekten och dess miljökonsekvenser behandlas i avsnitten 3.3 och 3.4. Luftföroreningar berörs här endast kortfattat.

---

[13] Boyle(1996), box 1.5.
[14] Perman(1996), s 144.
[15] Hoel&Kverndokk(1996), s 116.

Svaveldioxid bildas vid förbränningen av svavelhaltig olja och kol. SO_2 har direkta effekter på både växter och djur. Växternas tillväxt hämmas, och effekterna på människor inkluderar andningssvårigheter, rinnande ögon samt förvärrade symtom för människor med exempelvis astma och bronkit. Utsläpp av SO_2 medför också försurning av mark och vatten, med bl a allvarliga skogsskador som resultat. Effekterna är lokala och regionala.[16]

Kväveoxider bildas i förbränningsprocesser, när luftens kväve och syre förenas. Effekterna på människor liknar de som SO_2 ger upphov till på många punkter, och NO_x har liksom SO_2 försurande effekt. NO_x verkar också övergödande på sjöar och vattendrag, vilket leder till syrebrist och därmed döda havsbottnar. Effekterna är lokala och regionala.[17]

VOC:s (Volatile Organic Compounds) är ett samlingsnamn för en rad olika organiska substanser, bl a alkener, alkoholer, estrar, aldehyder och ketoner. Flera av de substanser som räknas till VOC:s är giftiga och verkar cancerframkallande på människor. Effekterna är främst lokala och VOC:s bryts ned relativt snabbt. [18]

Höga halter av sotpartiklar leder till andningssvårigheter och kan i samband med dimma bilda smog, ett problem som främst drabbar storstäder. Idag är problemen störst i utvecklingsländerna, där avgasrening är mindre vanligt och reningen sämre vid energiproduktion.

Ett problem med luftföroreningar är att det är svårt att veta hur de samverkar. Ofta är de enskilda substansernas effekter relativt välkända, men svårigheterna ökar när de förekommer i olika koncentrationer och kombinationer. Problemen är komplexa och informationen är ofta begränsad, med osäkerheter som följd. Denna komplexitet har därmed bäring på hur samhällets miljökostnadsfunktion formuleras.

---

[16] Nilsson&Johansson(1994).
[17] Nilsson&Johansson(1994).

3.3 Växthuseffekten

Av den solinstrålning som når jorden reflekteras en tredjedel tillbaka ut i rymden. Två tredjedelar av strålningsenergin blir kvar i atmosfären. Det mesta absorberas av marken, men en del av den infraröda strålning som reflekteras av jordytan tas upp av olika partiklar och molekyler i atmosfären. Den extra värmeenergi som blir resultatet av denna absorbtion, ger en högre medeltemperatur än vad som annars vore fallet, vilket populärt brukar kallas för växthuseffekt.

Växthuseffekten kan enkelt sägas bestå av två delar; en naturlig del och en antropogen del.[19] Den naturliga växthuseffekten från olika växthusgaser, exempelvis CO_2, metan och vattenånga, medför att temperaturen på jordytan och i troposfären är ca 33 grader C högre än vad som vore fallet utan dessa gaser.[20] En situation helt utan växthuseffekt är alltså otänkbar för livet på jorden. När växthuseffekten omtalas i olika medier som fenomen – och problem – avses vanligtvis istället det tillskott till den naturliga växthuseffekten som människan orsakar, s.k. antropogena utsläpp av växthusgaser. Den antropogena växthuseffekten är en nettoeffekt av olika påverkansfaktorer, en del med avkylande effekt (t.ex. stratosfäriskt ozon och aerosoler) och andra med värmande effekt (t.ex. CO_2 och metan).[21]

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) slår i rapporten 'Climate Change 2001: The Scientific Basis' (2001) fast att den globala genomsnitts-temperaturen vid jordytan under 1900-talet ökade med totalt 0,6 +/- 0,2 grader C. IPCC beräknar dessutom att den globala genomsnittstemperaturen vid jordytan väntas öka med mellan 1,4 och 5,8 grader C mellan åren 1990 och 2100, samt att vattenytan som ett globalt genomsnitt väntas öka med mellan 0,09 och 0,88 meter under samma tidsperiod.[22] Klimatforskare runt om i världen är i stora drag överens om att medeltemperaturen ökar, men man är inte lika överrens om hur snabbt det går och hur stor del som beror på människans utsläpp av växthusgaser.[23]

---

[18] Nilsson&Johansson (1994).
[19] Radiative forcing of Climate Change (1994).
[20] Radiative forcing of Climate Change (1994).
[21] Climate Change 2001: The Scientific Basis, IPCC (2001).
[22] Climate Change 2001: The Scientific Basis, IPCC (2001).
[23] Nilsson&Johansson (1994).

Koldioxid är den huvudsakliga växthusgasen och ett tydligt samband har identifierats mellan CO_2-halten och medeltemperaturen i atmosfären.[24] Andra substanser som metan och dikväveoxid har flera gånger högre absorberande kapacitet per molekyl, men förekommer i betydligt lägre koncentrationer i luften.[25]

Sedan 1750 har CO_2-halten i atmosfären ökat med 31 %. Den nuvarande halten är den högsta under de senaste 420 000 åren, och sannolikt också den högsta under de senaste 20 miljoner åren. En ökningstakt motsvarande dagens har inte förekommit på 20 000 år. IPCC slår fast att det mesta av den observerade globala uppvärmningen de senaste 50 åren har orsakats av de ökande koncentrationerna av växthusgaser i atmosfären, huvudsakligen härrörande från mänsklig aktivitet och framförallt förbrukningen av fossila bränslen. Ungefär 75 % av de senaste 20 årens CO_2-utsläpp orsakade av människan kan härledas till förbränning av fossila bränslen.

Det har konstaterats att långa tidsförskjutningar förekommer mellan ökade halter av CO_2 och resulterande temperaturökningar, vilket innebär att det tar lång tid innan utsläppen fram till idag har verkat fullt ut. [26] Utsläppen av långlivade växthusgaser kommer att påverka atmosfärens sammansättning och klimatet även länge efter det att koncentrationerna av dessa gaser eventuellt stabiliseras eller börjar avta. En stabilisering av halterna av växthusgaser i atmosfären väntas ge betydligt moderatare temperaturökningar än vad som riskerar bli fallet när halterna ökar på det sätt IPCC förutspår under 2000-talet[27]

Eftersom kostnaderna av en ökad medeltemperatur kan observeras först långt efter att utsläppen sker, finns risken att förbrukningen av fossila resurser fortgår längre än vad som egentligen är samhällsekonomiskt lönsamt. Utsläppen av koldioxid är

---

[24] Tauscher&Pollak(1994).
[25] Radiative forcing of Climate Change(1994).
[26] Hoel&Kverdokk(1996).
[27] Climate Change 2001: The Scientific Basis, IPCC (2001).

högre per år än vad som kan tas upp av växter och hav, vilket leder till att CO_2-utsläppen ackumuleras i atmosfären.[28]

3.4 Konsekvenser av en ökad växthuseffekt

Det finns idag tillgängliga data som visar att regionala klimatförändringar – huvudsakligen temperaturökningar – redan har påverkat olika fysisk och biologiska system i olika delar av världen. Bland de observerade förändringarna finns exempelvis krympande glaciärer, tinande permafrost, senare isläggning och tidigare islossning, längre odlingssäsonger på norra halvklotet samt minskningar i vissa växtbestånd och djurpopulationer. IPCC slår fast att sannolikheten för att dessa förändringar kan förklaras med slumpmässiga orsaker är försumbar. Därmed har det förändrade klimatet med hög säkerhet redan börjat påverka människans levnadsförutsättningar på jorden.[29]

IPCC delar in påverkansområdena i naturliga och mänskliga system. De väntade riskområdena i kategorin naturliga system är bl.a. glaciärer, korallrev, tropiska skogar, polara och alpina ekosystem. Enligt IPCC kan man välgrundat dra slutsatsen att den geografiska utbredningen av kommande skador och antalet påverkade ekosystem kommer att öka i takt med klimatförändringarna. Bland de mänskliga systemen väntas påverkan inom bl.a. vattenförsörjning, livsmedels-produktion, skogsbruk, fiskenäring, boende och energiförsörjning. Därutöver tillkommer t.ex. olika effekter på människors hälsa, samt avsevärda förändringar inom t.ex. försäkringsbranschen.[30]

IPCC preciserar några tänkbara konsekvenser beträffande extrema vädersituationer:
- högre maxtemperaturer över nästan alla landområden, fler värmeböljor,
- ökande lägsta temperaturer, färre kalla dagar, färre tillfällen med frost,
- fler situationer med kraftig nederbörd,
- ökande sommartorka över inlandsområden nära ekvatorn.

---

[28] Hoel&Kverndokk(1996).
[29] Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, IPCC (2001).
[30] Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, IPCC (2001).

Dessa konsekvenser, tillsammans med andra förändringar, är inte alltid negativa på alla platser där de förekommer. Sannolikt kommer ett förändrat klimat att medföra också positiva effekter i form av bättre skördar, lägre energiförbrukning osv. En intressant faktor är att IPCC bedömer att många av dessa förväntade extrema vädersituationer huvudsakligen kommer att drabba fattiga områden i världen. Fattiga områden drabbas värre av flera orsaker; dels därför att de är känsliga för ekonomiska och sociala belastningar i samband med exempelvis katastrofsituationer, dels därför att de inte har råd att vidta förebyggande åtgärder, men också av skälet att de inte har råd att anpassa sig efter de nya förutsättningar som skapas när klimatet förändras. I många fattiga delar av världen bor människor dessutom i tätbefolkade regioner i floddalar och nära kuster, vilket ökar känsligheten för extremt väder och störningar i livsmedelsproduktionen. Förutom de vädersituationer (varav några omnämnts) som IPCC tycker sig kunna sannolikhetsbedöma, förekommer risker som man i dagsläget bedömer mindre sannolika, men som man menar ännu är långt ifrån tillräckligt utredda. Här kan nämnas exempelvis avstannande strömmar av varmt vatten från oceanerna på södra halvklotet till norra Atlanten och avsevärt reducerade istäcken på Grönland och vid polarområdena.[31]

Vilka de verkliga konsekvenserna blir är inte möjligt att förutspå. Därmed är det också svårt att veta hur de förväntade kostnaderna (och intäkterna) bör hanteras när förbrukningen av fossila naturresurser skall optimeras. Riskerna kan ses som skuggkostnader, som på ett eller annat sätt belastar världsekonomin och dess invånare.

3.5 Ackumulerade utsläpp och varierande marginalkostnader

Ett problem med miljöförstörande utsläpp är att konsekvenserna ofta hänger samman med koncentrationerna i atmosfären, vilket får till följd att marginal-kostnaden av utsläpp varierar med rådande bakgrundsnivå av olika ämnen. Högre bakgrundsnivåer leder vanligtvis till allvarligare konsekvenser och högre marginalkostnader. I en redan hårt belastad region, med stor befolkning och höga

[31] Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, IPCC (2001).

halter av miljöförstörande ämnen i luften, kommer skadan på marginalen att vara större än om samma utsläpp skett i en glesbygdsregion med låga bakgrundsnivåer.[32]

Därmed beror skadan både på hur stort utsläppet är och i vilken koncentration substansen, och andra skadliga substanser, redan förekommer i miljön. Eftersom vissa ämnen ackumuleras i atmosfären med stigande marginalkostnader som följd, måste man ta hänsyn till detta när man försöker inkludera miljökostnader i den ekonomiska teorin.

3.6 Att värdera miljökonsekvenser

Övergripande kan sägas att flera olika metoder finns, och att svårigheterna generellt består i att översätta naturvetenskapliga data och komplexa sammanhang i ett och samma mått; pengar. Svårigheterna med att värdera miljökonsekvenser är omfattande, varför denna uppsats i fortsättningen inte gör några anspråk på att fördjupa diskussionen kring detta ämne. Syftet med uppsatsen är inte att exakt beräkna miljöeffekternas kostnader, utan att analysera hur växthuseffekten och andra miljöeffekter kan tänkas inverka på den ekonomiska teorin för optimal resursanvändning.

I fortsättningen antar jag att externa kostnader för samhället faktiskt förekommer vid utvinning och förbränning av fossila energiresurser, och behandlar dessa som skuggkostnader. Mot bakgrund av kapitel 3 torde detta vara ett realistiskt antagande, vilket gör den fortsatta analysen relevant ur ett samhällsekonomiskt perspektiv. Nästa steg blir därmed att formulera en relevant miljökostnadsfunktion att använda vid analysen av den förändrade modellen.

---

[32] Martin(1995).

4. Ökande miljökostnader – en kostnadsfunktion som tar hänsyn till ackumulerade utsläpp av CO_2

4.1 Inledning

I det här kapitlet ändras ett av antagandena i modellen från kapitel 2; nämligen det rörande externa kostnader. I fortsättningen antas att miljökostnader förekommer i samband med förbränning av fossila resurser. Jag utgår ifrån att utsläppen av koldioxid har inverkan på klimatet, och att denna mänskligt styrda klimatpåverkan leder till kostnader för samhället. Därmed behöver vi inlemma miljökostnaderna i modellen för att kunna analysera den för samhället optimala användningen av fossila naturresurser. Jag antar även fortsättningsvis att utvinningskostnaderna är lika med noll, vilket motsvarar fallet med konstanta marginalkostnader, men är enklare att hantera i analysen.

En matematisk funktion som fullt ut beskriver skuggkostnaden av miljöförstöring över tiden skulle behöva ta hänsyn till en lång rad faktorer, eftersom de miljöskadliga ämnena kan vara många och ofta samverkar på ett oöverskådligt sätt. Därför måste vissa begränsningar göras.

När en miljökostnadsfunktion som tar hänsyn till växthuseffekten skall formuleras, blir halten av CO_2 i atmosfären tillsammans med förbrukningstakten av fossila bränslen två relevanta faktorer att ta hänsyn till. Det förekommer även andra miljö-skadliga utsläpp i samband med utvinning, transporter och förbränning av fossila bränslen, men CO_2 får istället tjäna som symbol för de totala utsläppen av miljöpåverkande ämnen till atmosfären.

Vidare antas förbrukningen av fossila resurser, liksom utsläppen av CO_2, fortsätta under lång tid framöver. R betecknar en genomsnittlig fossil naturresurs som antas vara kolbaserad. Vidare antas att den utvunna resursen i sin helhet förbränns i samband med energiproduktion, och att detta leder till att en viss mängd CO_2 släpps ut till atmosfären per förbrukad resursenhet.

4.2 En miljökostnadsfunktion för växthuseffekten

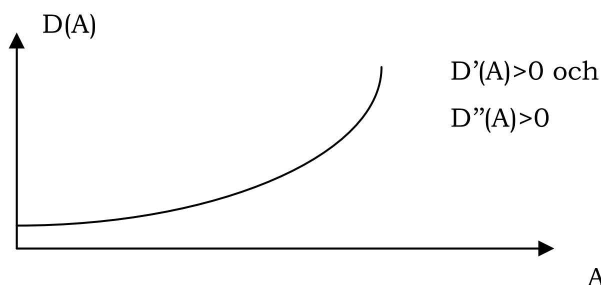
En miljökostnadsfunktion som beror av både den atmosfäriska halten av CO_2, och av löpande användning av resursen R, skulle kunna tecknas enligt följande: antag att A är den ackumulerade halten av CO_2 i atmosfären överstigande nivån före industrialiseringen. A=0 svarar alltså mot den nivå som rådde innan de mänskliga nettoutsläppen av CO_2 tog fart. A ökar i varje period med användningen av R, och minskar med den takt CO_2 bryts ned i atmosfären. Denna nedbrytningshastighet tenderar att minska i takt med att CO_2-nivån ökar, till följd av att havens upptagningsförmåga minskar.[33] Koldioxidens livstid i atmosfären väntas därigenom öka i takt med att medeltemperaturen stiger. För enkelhets skull antas nedbrytningstakten vara konstant, b. Därmed kan den av människan orsakade halten av CO_2 i atmosfären, A, i varje tidpunkt skrivas som

$$A_t = A_{t-1} + R_t x - b$$

där x är en omvandlingsfaktor mellan mängden förbrukad resurs och tillskott av CO_2 till atmosfären. Vidare antas $R_t x > b$ under den tid modellen hanterar, vilket leder till att $A_t > A_{t-1}$ gäller i alla perioder. Detta torde vara ett hållbart antagande åtminstone för tiden från idag fram till år 2100.[34]

Miljöskadorna till följd av ökad växthuseffekt, D, antas vara en funktion av det av människan orsakade tillskottet av CO_2, varför D=D(A). D(A) antas vara både ökande och konvex, så att D'(A)>0 och D''(A)>0 för alla A, vilket illustreras i figur 4.2.1.

Figur 4.2.1: Det antagna sambandet mellan miljökostnader och atmosfärisk halt av CO2.



[33] Hoel&Kverndokk(1996).
[34] Climate Change 2001: The Scientific Basis, IPCC (2001).

Miljökostnaden antas bero av CO_2-halten, som varierar med differensen mellan tillförd och nedbruten mängd CO_2 i varje period, vilket i sin tur beror av den takt resursen R förbrukas, R_t. Alltså måste R_t vara en del av en miljökostnadsfunktion som beskriver effekterna av en ökad växthuseffekt. Låt F vara den miljökostnad som följer av användningen av R, och nivån på A. Funktionen kan skrivas som

$$F_t = D(A_t)R_t$$

där F_t ökar med både A och R, dvs. D(A)>0 för alla A>0 och D'(A)R>0 för alla R>0. Givet en viss förbrukning, R, ger ett högre värde på A en högre miljökostnad, och givet ett visst värde på A ger en högre förbrukning av R en högre miljökostnad.

Antaget att förbrukningen av fossila resurser fortsätter i en sådan omfattning att halten av CO_2 hela tiden ökar, och antaget att skadefunktionen kan beskrivas enligt D(A) ovan, kan man nu generellt beskriva växthuseffektens miljökostnader F som en ökande, och accelererande, marginell belastning på samhället över tiden. Mot bakgrund av dessa antaganden kan vi nu på ett relevant sätt analysera hur F kan inlemmas i teorin om optimal användning av icke-förnybara naturresurser.

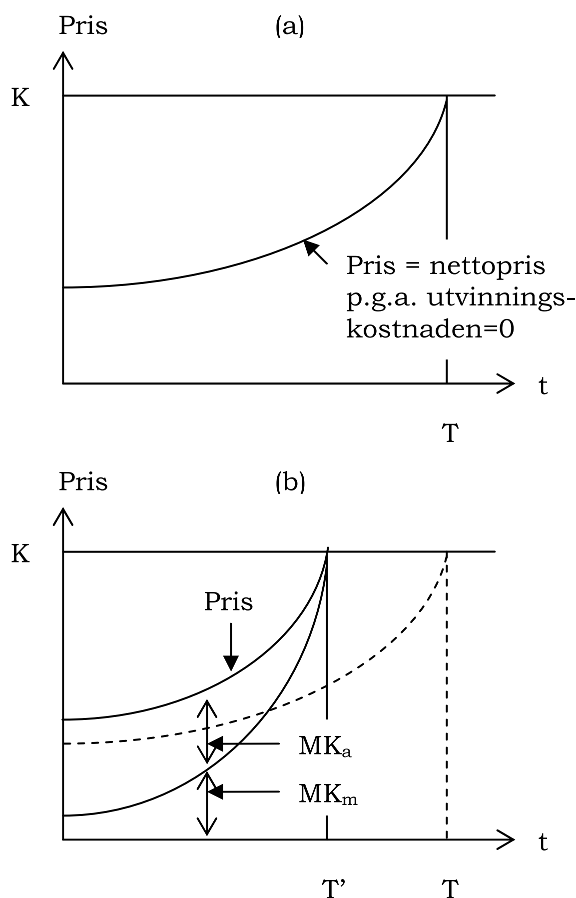
4.3 Miljökostnaderna inkluderade i teorin

Samhällets kostnader för att använda resursen R är nu inte längre lika med noll, och inte heller konstanta. Vi antar att all utvunnen resurs används för energiproduktion, och att externa kostnader för samhället därigenom uppkommer.

Vidare antas att en alternativ energiteknologi finns tillgänglig till priset K, enligt vad som närmare beskrevs i efterfrågekurvan i kapitel 2. Den alternativa teknologin fungerar som ett kostnadstak på marginalen för fossilbaserad energiproduktion, vilket innebär att samtliga energiproducenter byter till alternativet i samma ögonblick priset på fossil energi når K. Men när sker då detta? Vi har tidigare sett att *hela* resursen förbrukas (innan inkluderandet av miljökostnader i teorin), och att den optimalt tar slut när priset, alltså summan av utvinningskostnad (här antagen vara konstant lika med noll) och användarkostnad på marginalen, når K. Ett nödvändigt villkor är också att Hotellings regel är uppfylld, dvs. att nettopriset stiger

med räntan. Är då detta fortfarande giltigt vid förekomsten av externa kostnader? Figur 4.3.1 liksom det efterföljande resonemanget ger svaret på frågan.

Eftersom vi har antagit att all utvunnen resurs nyttjas för energiändamål, medför varje utvunnen enhet av R en kostnad för samhället i form av ökad växthuseffekt. Denna kostnad, på marginalen lika med D(A), medför att marginalkostnaden av att förbruka R ökar med tiden. Eftersom vi antagit att D”(A)>0 så kommer ökningen dessutom att accelerera vilket påverkar användarkostnaden. Detta illustreras i figur 4.3.1.



Figur 4.3.1: (a) Inga miljökostnader förekommer. Nettopriset (här marknadspriset) ökar med räntan. Resursen tar helt slut i T. (b) Ekonomisk utmattning. Samhällets marginalkostnad når K innan resursen är förbrukad. Det kan noteras att den marginella användarkostnaden minskar över tiden, för att i T’ vara lika med noll. Detta beror på att resursen från och med den tidpunkten inte kan inbringa en nettointäkt till samhället, varför den sista utvunna enheten inte medför någon uppoffring för kommande generationer. Eller annorlunda uttryckt, *den sista ekonomiskt utvinningsbara enheten har ingen alternativkostnad.*

MK_m = marginalkostnad för miljöskador
MK_a = användarkostnad (nettopris) på marginalen

En ökande samhällelig marginalkostnad (i detta fall miljökostnader) för fossila resurser innebär alltså att användarkostnaden på marginalen minskar med tiden.[35] Ökande marginalkostnader i samband med utvinning (inklusive miljökostnader) medför att den potentiella vinsten (eller nyttan) av fossil energiproduktion minskar för kommande generationer. För varje utvunnet ton blir det samhällsekonomiskt sett mer kostsamt att omvandla resursen till energi, givet ovan gjorda antaganden. Resursen blir samhällsekonomiskt utmattad när marginalkostnaden når K, vilket innebär att resursen inte nödvändigtvis kommer att förbrukas i sin helhet. Det blir således ekonomiskt attraktivt att (helt) byta till den alternativa energiteknologin innan resursen tagit fysiskt slut.

Det är möjligt att hela resursmängden förbrukas även om miljökostnaderna tas med i modellen, under förutsättning att marginalkostnaden inte når K innan resursen är förbrukad. Med utgångspunkt i de risker som den ökande växthuseffekten för med sig är det dock inte osannolikt att miljökostnadsfunktionen D(A) har den form som här antagits. Om så är fallet är det även rimligt att anta att resursen blir ekonomiskt utmattad innan den tar fysiskt slut, eftersom kostnaderna för samhället riskerar att öka snabbt. Som tidigare noterats finns två faktorer som talar för snabbt ökande samhälleliga marginalkostnader; att såväl den atmosfäriska *bakgrundsnivån* som *utsläppstakten* av CO_2 globalt ökar och väntas fortsätta öka.[36]

Vad skulle det då betyda om samhällets miljökostnader till följd av CO_2 – utsläpp faktiskt kan beskrivas med en funktion av den typen som tecknats ovan? Dvs. inte bara ökande marginella miljökostnader över tiden, utan dessutom accelererande kostnader? Skillnaden mot linjärt ökande marginalkostnader (vilket också är tänkbart teoretiskt, men knappast i verkligheten) blir en högre grad av oförutsägbarhet och osäkerhet. För att optimera användningen av fossila naturresurser i en värld präglad av komplexa samband med samverkande miljöskador krävs omfattande kunskaper om dessa samband liksom om hur miljö-skadornas kostnader skall värderas. Jag skall i de följande avsnitten i detta kapitel

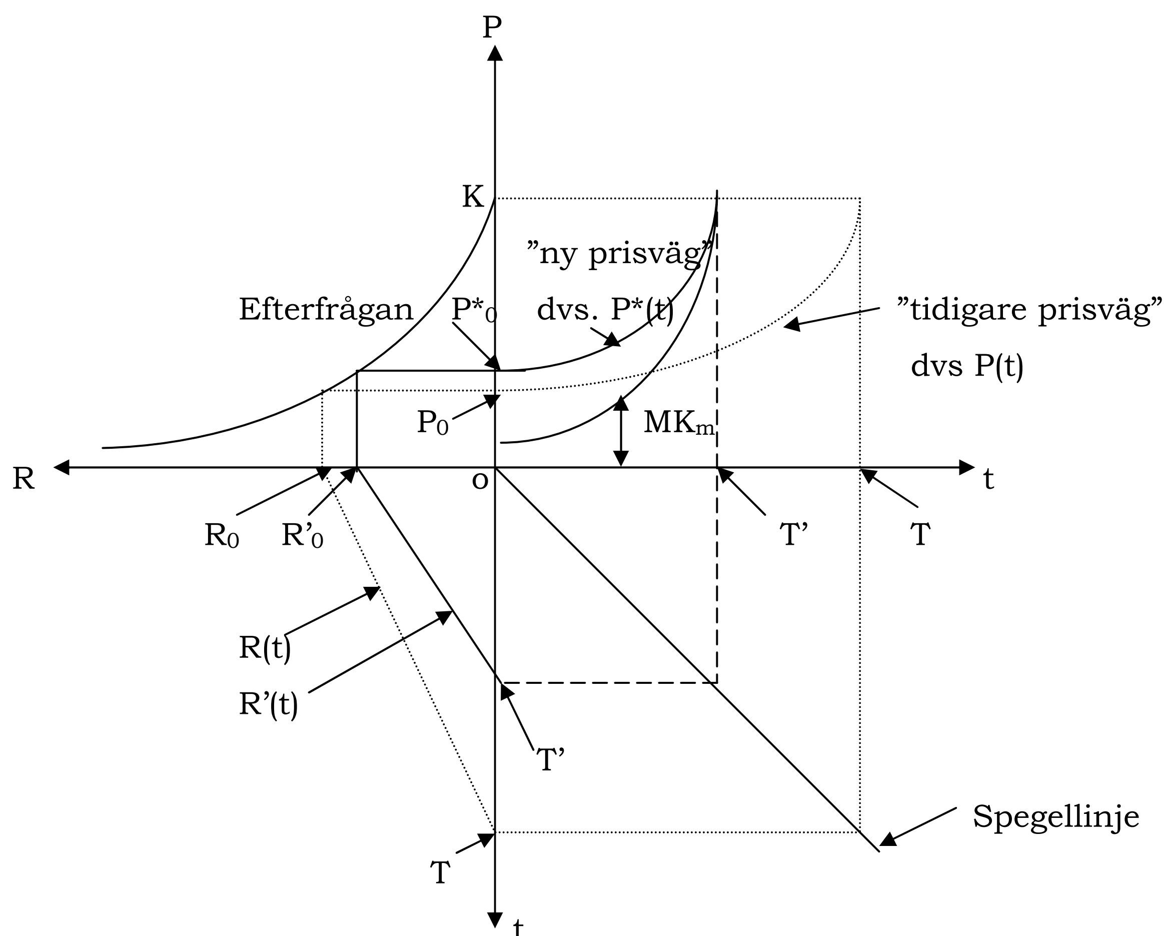
[35] Jag jämför här med Tietenberg(1992), fotnot s. 132, samt exempel s, 136-137 där utvinningskostnaderna ökar på marginalen och beror av total mängd utvunnen resurs.
[36] Climate Change 2001: The Scientific Basis, IPCC (2001).

återvända till den grafiska lösningen till modellen i kapitel 2, och även till Hotellings regel.

4.4 Den kompletterade modellen i sin helhet

Figur 4.4.1 visar den grafiska modellen i sin helhet. Med miljökostnaden MK_m inkluderad, är det inte längre optimalt att använda hela mängden. Betrakta nedre vänstra kvadranten och jämför med figur 2.4.1. Utan förekomsten av externa kostnader var det optimalt att förbruka hela resursmängden, H*, alltså triangeln R_O-o-T. Med miljökostnaden MK_m inkluderad kommer en mängd av resursen att lämnas outvunnen.

Figur 4.4.1: En generell grafisk lösning till optimeringsproblemet över kontinuerlig tid, med miljökostnader inkluderade. Jämför övre högra kvadranten med figur 4.3.1.



Vi får alltså en ny ”prisväg” i fallet externa med miljökostnader inkluderade. Till följd av ökande samhälleliga marginalkostnader ökar priset snabbare, och når K i ett tidigare skede än i fallet utan miljökostnader. Därmed blir den alternativa teknologin ekonomiskt attraktiv tidigare än vad som blev fallet i kapitel 2.

En ganska avgörande observation är att Hotellings regel inte längre tycks gälla, eftersom användarkostnaden enligt de tidigare resonemangen minskar över tiden när miljökostnaderna inkluderats i modellen. Denna observation analyseras vidare här nedan.

4.5 Hotellings regel – fördjupad analys

I avsnitt 2.3 presenterades den grundläggande modellen för optimalt nyttjande av icke-förnybara naturresurser. En viktig slutsats var – givet gjorda antaganden – att Hotellings regel behövde uppfyllas för att förbrukningen av resursen skulle ske på ett samhällsekonomiskt optimalt sätt. Hotellings regel

$$\frac{NP_t - NP_{t-1}}{NP_{t-1}} = r$$

slår alltså fast att nettopriset, skillnaden mellan priset och utvinningskostnaden, skall utvecklas i takt med den ränta som avspeglar samhällets avvägningar mellan nutida och framtida konsumtion. Som tidigare nämnts blir utfallet identiskt mellan de båda situationerna 1) perfekt konkurrens och 2) en fullständigt informerad samhällsplanerare, under förutsättning att samhällets nyttofunktion är utilitaristisk och att nyttan genereras endast av konsumtion. Det diskonterade nettopriset skall alltså vara konstant över tiden när resursförbrukningen sker optimalt. För tydlighetens skull är alltså nettopriset detsamma som användarkostnaden.

Perman(1996) slår fast att: ”Hotelling’s is, in fact, an efficiency rule – a rule which will be satisfied by any pattern of exhaustible resource extraction over time to be intertemporally efficient.” (kap. 5, s. 126).

Tillämpningen av Hotelling's regel är inte helt okomplicerad i situationen med externa miljökostnader som nytt element i modellen. Vi har ju sett att användarkostnaderna minskar över tiden och blir 0 när resursen utmattas ekonomiskt. Vad är det då som gör att Hotellings regel tycks sättas ur spel i denna situation?

Citatet från Perman(1996) skall läsas mot bakgrund av tidigare gjorda antaganden, såsom att inga externa miljökostnader förekommer och att resursen därmed kan utvinnas i sin helhet i en situation där *absolut knapphet* av resursen fortfarande råder. Perman(1996) inför senare begreppet *relativ knapphet* (s. 161) vilket kanske kan bidra till svaret på frågan om Hotellings regel giltighet. I den enkla modellen var utvinningskostnaderna konstanta eller t.o.m. lika med noll, och Hotellings regel visade där att med en hög grad av knapphet – vi skulle kunna kalla det för en hög grad av *fysisk knapphet* – så skall utvinningen av resursen ske så att netto-prisökningen motsvarar samhällsräntan för att avspegla att varje kvarvarande enhet av resursen blir alltmer värdefull i takt med att den utvinns. Här finns inga hinder för att utvinna hela resursen, utan den samhällsplanerare som kontrollerar utvinningstakten söker med resurskvantiteten som enda begränsning att maximera nuvärdet av resursen, som med tiden går mot fullständig förbrukning.

Det tycks alltså vara så att graden av knapphet är avgörande för Hotellings regel giltighet, vilket först kan tyckas något märkligt. Kan ekonomiska resonemang verkligen föras med utgångspunkt i att ett begrepp som *knapphet* förekommer i gradskillnader och att detta dessutom påverkar resultaten av den teoretiska modellen? Antingen är väl resursen knapp för samhället, med konsekvensen att förbrukningen av de sista resursmängderna innebär en påtaglig uppoffring för kommande generationer – resursen tar de facto *slut*. Eller så är resursen inte att beteckna som knapp, dvs. det innebär ingen egentlig kostnad för samhället då vi förbrukar resursen. Eller finns fler dimensioner av begreppet knapphet? Analysen här tycks visa att begreppet *relativ knapphet* i Perman(1996) är ett begrepp som är försett med gråskala.

Mot bakgrund av analysen ovan kan några möjliga svar på frågan om Hotellings regel begränsade giltighet skönjas:

1) Hotellings regel äger ingen giltighet när resursen har låg eller ingen *fysisk* knapphet. I vårt exempel finns för det första en alternativ energiresurs till känd marginalkostnad, och det är dessutom möjligt och rent av troligt, att resursen inte kommer att utvinnas i sin helhet. Därmed råder endast en begränsad ekonomisk knapphet, eftersom resursen blir ekonomiskt utmattad innan den tar slut. I figur 4.4.1. på sidan 29 har ju resursen ändå en positiv marginell användarkostnad som en följd av att resursen finns tillgänglig i begränsad fysisk mängd i marken. I det fallet kommer ju all utvinning av resursen per definition att begränsa framtida fysiskt utnyttjande av resursen oavsett kostnads- och prisnivåer. Om man istället tänker sig att resursen finns i oändlig mängd, men likväl orsakar skador på miljön när den utvinns och förbrukas, bör priset i figur 4.3.1.b. sammanfalla med den marginella miljökostnaden. Detta eftersom resursutnyttjandet inte påverkar kommande generationer *över huvud taget*, sett till resursens tillgänglighet, och att det därför inte finns några användarkostnader vid utnyttjandet av resursen.

2) Hotellings regel är i allra högsta grad fortfarande giltig, då de marginella miljökostnaderna vid användning av resursen inte kan behandlas på samma sätt som utvinningskostnader, eftersom de förstnämnda är externa och därmed förekommer som skuggkostnader i samhället. Något som skulle kunna stödja denna tes är det faktum att Perman(1996) slår fast (s. 159) att en skatt på utvinning (låt säga motsvarande den marginella miljökostnaden) inte skulle förändra villkoren för optimalitet med avseende på giltigheten i Hotellings regel. Nettopriset (exklusive miljökostnader) utvecklas fortfarande med räntan, men det som händer är att staten tar in en del av nettopriset i form av skatt till dess att resursen blir ekonomiskt utmattad. Jämför med figur 4.3.1.b. och 4.4.1. där startpriset stiger när miljökostnaderna inkluderas i modellen, men där utvecklingen av nettopriset ändå *kan* uppfylla Hotellings regel. En annan komplicerande faktor är att analysen i denna uppsats förenar en teori för *utvinning* av naturresurser (naturresursekonomi) med en skadefunktion kopplad till *användning* av resursen (miljöekonomi). Möjligen

kan det vara så att Hotellings regel inte blir ett relevant mått på optimalitet när vi lämnar den ursprungliga modellen.
Min bedömning är att 2) inte håller samma analytiska styrka som 1) ovan, eftersom en kostnad för samhället rimligen kan behandlas på samma sätt oavsett om den uppstår som utvinningskostnad eller miljöförstöring. En annan sak som talar emot att utvinningskostnader och miljökostnader skall behandlas olika i analysen är följande exempel; antag att miljökostnaderna relaterade till CO_2-utsläpp ökar mycket kraftigt, och snabbt driver marknadspriset till back-stop nivån K. Även om samhället tar in en del av detta som skatt (motsvarande den marginella miljökostnaden) så finns inget som säger att Hotellings regel är uppfylld. Om så skulle vara fallet i alla olika situationer skulle det implicera att räntan beror av hur snabbt miljökostnaderna stiger, vilket naturligtvis är orimligt. Och att samhällsräntan som styrande effektivitetsvillkor för nettoprisökningarna skulle vara överordnat det grundläggande ekonomiska villkoret att alla kostnader förknippade med en transaktion skall inkluderas i marknadspriserna, förefaller inte heller det rimligt.

Men för att återknyta till analysen under 2) ovan – i det fall dessa två modeller egentligen är mer komplexa att förena än vad som framgår av ovanstående analys, kan det vara så att Hotellings regel saknar relevans utanför modellen i kapitel 2. Och då faller även mitt resonemang i det föregående stycket. För att testa detta fullt ut krävs en utförligare analys med inslag av datorkörningar av modellen med och utan miljökostnader inkluderade.

Således blir min slutsats av ovanstående resonemang, antaget att de båda modellerna är förenliga, att Hotellings regel sätts ur spel i frånvaro av fysisk knapphet i samband med utvinning av naturresurser.

5. Slutsatser

5.1 Slutsatser inom ramen för teorin

Först några kommentarer kring den typ av modeller som har utgjort basen för analysen i denna uppsats. I kapitel 2 gjordes följande antaganden:

- resursen finns i en begränsad, känd mängd,
- den håller samma kvalitet på alla fyndplatser,
- ingen teknologisk utveckling fortgår under tiden för utvinning,
- den kan överallt utvinnas till samma konstanta marginalkostnad,
- inga externa effekter förekommer.

Naturligtvis är inget av dessa antaganden realistiskt. Dessutom är det inte säkert att samhällets rådande uppfattning om fördelning av resurser mellan nutid och framtid, den aktuella samhällsräntan, är konstant över tiden. Allt detta gör att den sådan modell vi skulle önska oss, fullt ut anpassad till verkliga förutsättningar, sannolikt är något av en utopi.

För att ändå kunna analysera och reflektera kring dessa i allra högsta grad relevanta frågeställningar, får vi nöja oss med att göra strama antaganden och sedan justera någon eller några parametrar i taget.

Föresatsen i detta arbete var att med hjälp av en befintlig enkel ekonomisk modell, och en teoretiskt konstruerad men realistisk miljökostnadsfunktion, analysera och resonera kring hur den optimala användningen av icke-förnybara naturresurser kan komma att ändras när externa effekter förekommer. Vilka slutsatser kan då dras efter att problemet analyserats?

Det kan konstateras att inkluderandet av växthuseffektens väntade kostnader i resurspriserna, medför att fossila naturresurser riskerar bli ekonomiskt utmattade innan de tar fysiskt slut. Därmed kan det vara samhällsekonomiskt lönsamt att

lämna en del av resursen outnyttjad, och att byta till någon alternativ resurs eller energiteknologi innan den fossila resursen är fysiskt slut.

Vidare kan det konstateras, att ett större samhälleligt hänsynstagande till miljö-konsekvenser, skulle snabba på överväxlingen till alternativa energiteknologier. Givet de antaganden som gjorts, riskerar samhällets marginalkostnad av att använda fossila naturresurser bli högre än vad alternativen faktiskt kostar, trots att det kanske inte avspeglas i marknadspriserna på råvaror och energi. Det är alltså av yttersta vikt att försöka uppskatta samhällets marginalkostnader av fossil energiproduktion och av de klimatrubbningar som väntas, i syfte att få en effektiv användning av fossila naturresurser.

Det kan också påpekas att de stora osäkerheter som föreligger beträffande växthuseffektens kostnader *i sig* är en belastning för samhället. Man bör därför på något sätt försöka inkludera dessa risker i råvaru- och energipriserna, även om uppgiften att i detalj kostnadsbestämma miljökonsekvenserna visar sig vara alltför komplicerad. Här kan försiktighetsprincipen fungera som riktlinje.

Avslutningsvis kan det konstateras att Hotellings regel tycks bli satt ur spel när den naturresurs som skall utvinnas saknar egentlig fysisk knapphet. Åtminstone pekar analysen på att så blir fallet vid förekomsten av externa miljökostnader, i detta arbete symboliserat av att miljökostnader driver resursen till att bli ekonomiskt utmattad.

5.2 Empirisk epilog

Avslutningsvis lämnar vi modellerna, och jämför med verkligheten. I verkligheten sjunker råvarupriserna på fossila naturresurser. Radetzki(1997) visar att trenden är, och har varit, sjunkande marknadspriser under mycket lång tid. Förklaringen ligger i att verkligheten på olika sätt avviker från teorin. Nya fyndigheter görs med jämna mellanrum, med sjunkande priser som följd. Den teknologiska utvecklingen fortgår hela tiden, vilket medför lägre utvinningsmetoder. Den fullständigt informerade samhällsplaneraren lyser med sin frånvaro, liksom den perfekta marknaden. Istället

härskar starka oligopol och några råvarustarka staters ekonomiska intressen över världens fossila naturresurser, och i förlängningen också resurspriserna.

De sjunkande priserna på fossila råvaror, i kombination med ständigt effektivare energiteknologier, leder enligt Radetzki till slutsatsen att vi kan producera energi med fossila bränslen till låga kostnader långt in i framtiden. Skräckscenarier med resurser som tar fysiskt slut är, menar Radetzki, inget annat än myter som följt människan i flera hundra år. Men kanske finns andra problem än att resurserna tar fysiskt slut? Nya tider föder nya faror. Dagens påtagliga risker med ökad växthuseffekt är knappast fullt ut internaliserade i de gällande marknadspriserna på fossila naturresurser.

Hur risker och miljökostnader skall inkluderas i priserna är en komplex fråga. Ekonomer föreslår ofta olika typer av ekonomiska styrmedel, såsom skatter motsvarande miljökostnaden. Problemet är att detta blivit mycket svårt att genomföra i dagens globala ekonomiska system, där hänsynen till enskilda staters och enskilda industriers internationella konkurrenskraft ofta värderas högre än miljön. När det gäller åtgärder för att minska utsläppen av koldioxid är nationella insatser knappast särskilt meningsfulla. Istället krävs internationellt samarbete.

Den handel med utsläppsrätter som just nu testas inom EU, för att i marknadspriserna på energi internalisera en del av kostnaderna förknippade med CO_2-utsläpp, är ett modernt gränsöverskridande marknadssystem. Initiativet är välkommet, och tanken i grunden klok. Men systemet är inte problemfritt. Ett grundläggande problem är att alla sektorer inte omfattas av utsläppshandeln, där exempelvis hela trafiksektorn står utanför. Och effekten på den nordiska elmarknaden har hittills varit mycket negativ. Världens kanske mest utvecklade elmarknad har rubbats i sina grundvalar. Idag är priset per MWh över 40 Euro för överskådlig framtid, av vilket ca 15 Euro utgörs av marginalpriseffekter som följd av utsläppsrätterna. (1 Euro/MWh ≈1 öre/kWh) Detta kan vid en första anblick te sig positivt – det var väl syftet med utsläppsrätterna? Men dessa miljarder kommer inte användas för att bygga ut miljövänlig elproduktion, vilket var en av grundtankarna med systemet, utan hamnar istället i de stora nordiska kraftbolagens ägarfickor.

Eftersom den nordiska kraftmixen består av huvudsakligen vatten och kärnkraft, som inte släpper ur koldioxid, blir effekten av marginalprissättningen att de ökade intäkterna går till företag som knappast behöver köpa utsläppsrätter för sin produktion i Norden över huvud taget.

Utöver detta har även utsläppsrätterna medfört stora svårigheter att förutspå det framtida kraftpriset, vilket skapar stora osäkerhetspremier i marknadspriserna, något som drabbar konsumenterna hårt.

Kanske finns ändå en positiv sida av allt detta, förutom att tanken med systemet är god? Den höga prisnivån kanske leder till minskad energikonsumtion, vilket kan ge positiva effekter för miljön.

Förhoppningsvis korrigeras systemet med tiden, så att det bättre tjänar sitt syfte. Tanken med internationell marknadsbaserad koldioxidhandel är i grunden god.

Avslutningsvis kan sägas att denna uppsats har belyst det faktum att fossil energiproduktion kan bli samhällsekonomiskt olönsam redan innan resurserna tar slut, och att detta torde vara fullt möjligt även i en situation med sjunkande råvarupriser. Det stora problemet idag är inte resurser som tar slut, utan marknadspriser som inte innehåller samhällets verkliga kostnader för energi och råvaror.

Lösningar finns, genom internationell handel med utsläppsrätter, skatter och genom att hålla sig till försiktighetsprincipen – men finns den politiska viljan?

6. Litteraturlista

Anderson, D.,& Bird, C.D., Carbon accumulations and technical progress – A simulation study of costs. *Oxford Bullentin of Economics and Statistics*, vol 54, No 1, 1-29, 1992.

Baltscheffsky, S., Vi har redan börjat förändra klimatet. SNF årsbok, 1997.

Boyle, G., Renewable Energy – Power for a sustainable world. Alden Press Ltd, Oxford 1996.

Fishelson, G., Backstop technology for an exhaustible resource: A fresh look at an old problem. *Resource and Energy Economics*, vol 15, s 387-396, 1993.

IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis, IPCC, 2001.

IPCC, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, IPCC, 2001.

Hartwick, J.& Oleweiler, N., The economics of natural resource use. 1997.

Hoel, M.&Kverndokk, S., Depletion of fossil fuels and the impacts of global warming. *Resource and Energy Economics*, vol 18, 1996, s 115-136.

Holdren, J.P., Energy in transition. *Scientific American*, s 157-163, sept 1990.

Nilsson, L.J.&Johansson, T.B., Environmental challenges to the energy industries. Sustainable development and the Energy Industries: Imple-mentation and Impact of Environmental Legislation. N. Steen (ed.), RIIA/Earthscan, London, 1994.

N.N., Summary for Policymakers: Radiative forcing of Climate Change, 1994.

Perman, R., Ma, Y.& McGilvray, J., Natural resource and environmental economics. Longman, London, 1997.

Pihl, H., Miljöekonomi för en hållbar utveckling, SNS Förlag, 1997.

Radetzki, M., Fossil fuels will not run out. *Journal of Mineral Policy, Business and Environment Raw Materials Report*, vol 12, No 2, 1997?.

Tauscher, W.& Pollak, K., The reduction of the greenhouse effect and the possibilities of the mineral oil industry, *Natural Resources and development*, vol 39, s 39-51, 1994.

Tietenberg, T., Environmental and resource economics. HarperCollins Publ. Inc. USA, 1992.

Tilton, J. E., Exhaustible resources and sustainable development - two diffe-rent paradigms. *Resources policy*, vol 22, No 1, s 91-97, 1996.

Wolfson, D.J.& Koopmans, C.C., Regulatory taxation of fossil fuels: Theory and Policy. *Ecological Economics*, vol 19, s 55-65, 1996.